شارح: الترانزستور

في هذا الشارح، سوف نتعلَّم كيف يمكن استخدام الترانزستور مفتاحًا في الدوائر الكهربية.

أهم خواص الترانزستور أنه يعمل عمل المفتاح. بتعبير أدق، يمكن أن يحوِّل الترانزستور تغيُّرًا طفيفًا في التيار إلى تغيُّرٍ أكبر في التيار.

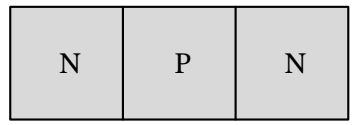
يتكوَّن الترانزستور من ثلاث مناطق مصنوعة من أشباه موصِّلات مُطعَّمة.

يتكوَّن أي شبه موصِّل مطعَّم من النوع n من شبكة ذرية عدد الإلكترونات الحرة بها أكبر من عدد الذرات التي لها فجوات في غلافها الخارجي.

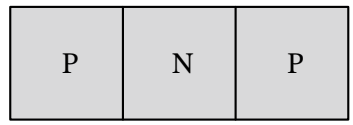
ويتكوَّن أي شبه موصِّل مطعَّم من النوع p من شبكة ذرية عدد ذراتها التي لها فجوات في غلافها الخارجي أكبر من عدد الإلكترونات الحرة بها.

يمكن تكوين ترانزستور بوضع شبه موصِّل من النوع p بين اثنين من أشباه الموصِّلات من النوع n. ويمكن أيضًا تكوين ترانزستور بوضع شبه موصِّل من النوع n بين اثنين من أشباه الموصِّلات من النوع p.

هذان النوعان من الترانزستورات موضَّحان في الشكل الآتي.



ترانزستور NPN



ترانزستور PNP

يتكوَّن كلا الترانزستورين NPN وPNP من ثلاث مناطق.

عند توصيل الترانزستور بدائرة كهربية، تُوصَّل الدائرة بكل منطقة من تلك المناطق الثلاث.

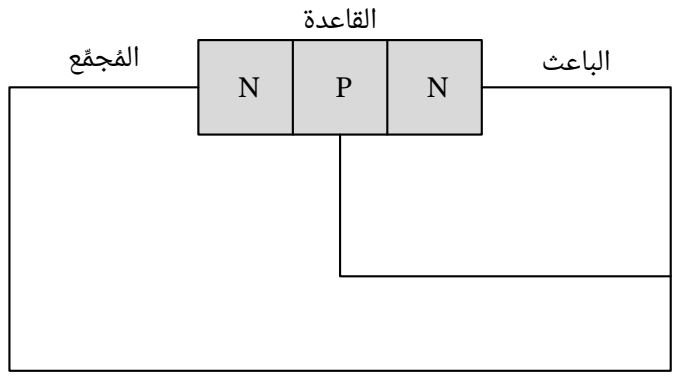
تُسمَّى مناطق الترانستور الثلاث:

- الباعث
- المُجمِّع

القاعدة

القاعدة أقل تطعيمًا بالشوائب من الباعث بدرجة كبيرة.

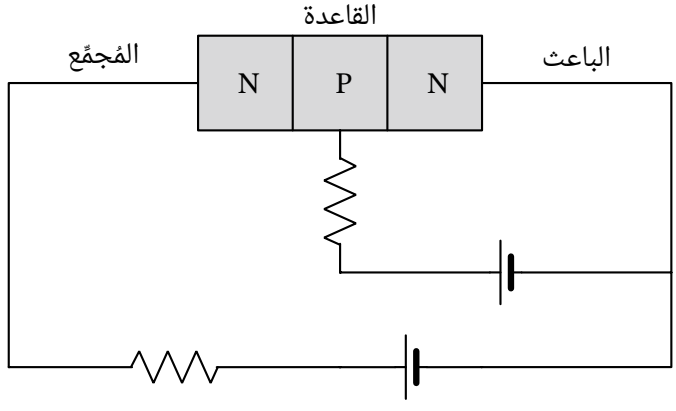
الدائرة التي تصل تلك المناطق الثلاث بهذه الطريقة تُسمَّى دائرة ترتيب الباعث المشترك. وهذا موضَّح في الشكل الآتي.



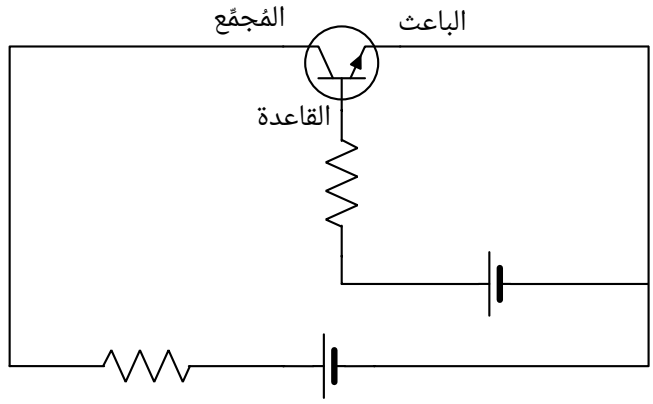
نلاحظ أن الترانزستور في هذه الدائرة هو ترانزستور من النوع NPN.

لكي يمر تيار في هذه الدائرة الكهربية يجب أن يكون هناك فرق جهد عبر جزءٍ ما من الدائرة. وفي دائرة الترانزستور، يوجد مصدر لفرق الجهد في كل مسار من الدائرة. كما توجد أيضًا مقاومة في كل مسار من الدائرة.

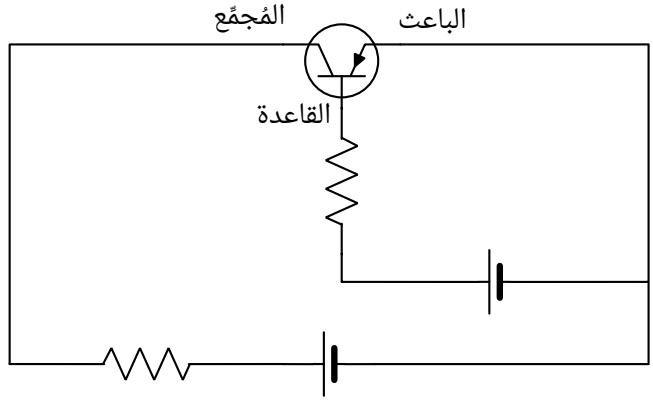
يوضِّح الشكل الآتي الدائرة الكهربية بجميع مكوِّناتها.



يمكن أيضًا تمثيل دائرة الترانزستور باستخدام رمز دائرة الترانزستور. وهذا موضَّح في الشكل الآتي.



في الترانزستور من النوع PNP، يختلف الرمز اختلافًا طفيفًا كما يوضِّحه الشكل الآتي.

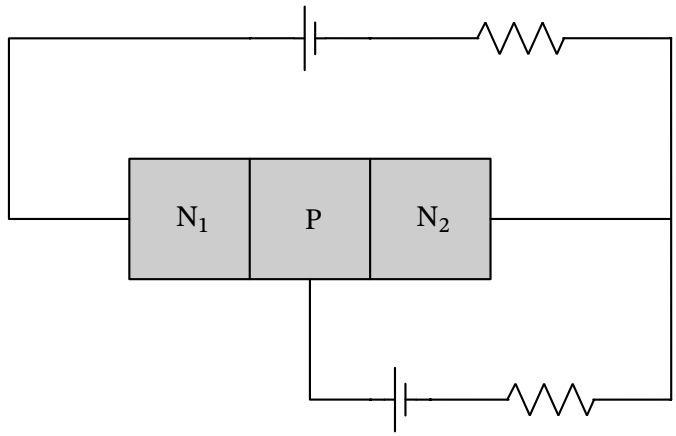


نتذكَّر أن تطبيق فرق جهد عبر الحد الفاصل بين مادتين شبه موصِّلتين إحداهما من النوع p والأخرى من النوع n؛ ينتج عنه إما توصيل أمامي وإما توصيل عكسي عبر ذلك الحد.

هيا نُلقِ نظرة على مثال يتضمَّن دائرة ترانزستور.

مثال ١: تحديد مناطق الترانزستور

وُصِّل ترانزستور NPN بمصدرَي تيار مستمر، كما هو موضَّح بالشكل. المنطقتان n متطابقتان.



١. أيٌّ من مناطق الترانزستور منطقة المُجمِّع؟

٢. أيٌّ من مناطق الترانزستور منطقة الباعث؟

الحل

الجزء الأول

الطرف الموجب لمصدر التيار الموصَّل بكلٍّ من N_1 وN_2 متصل بـ N_1.

بالنسبة إلى ترانزستور الباعث المشترك من النوع NPN، يكون الطرف الموجب للمصدر الموصَّل بكلٍّ من N_1 وN_2 متصلًا بالمُجمِّع.

ومن ثمَّ، N_1 هو المُجمِّع.

الجزء الثاني

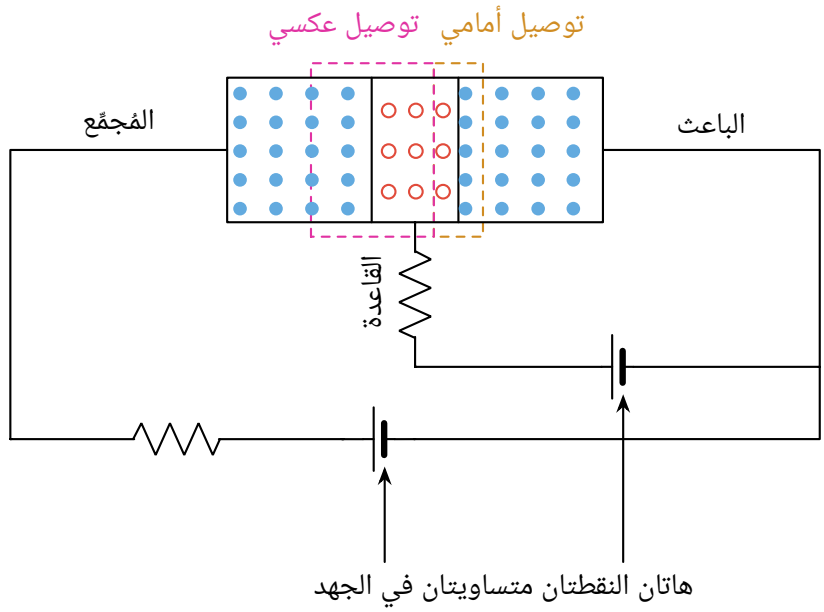
الطرف السالب لمصدر التيار الموصَّل بكلٍّ من N_1 وN_2 متصل بـ N_2.

بالنسبة إلى ترانزستور الباعث المشترك من النوع NPN، يكون الطرف السالب للمصدر الموصَّل بكلٍّ من N_1 وN_2 متصلًا بالباعث.

ومن ثمَّ، N_2 هو الباعث.

يتأثَّر التيار في دائرة الترانزستور بالانحيازات عند حدود القاعدة والمنطقتين المجاورتين لها.

يوضِّح الشكل الآتي كيف تستجيب المواد من النوع p والنوع n في ترانزستور NPN لمصدرَي فرق الجهد في الدائرة. الإلكترونات الحرة موضَّحة بدوائر لونها أزرق. والفجوات موضَّحة بحلقات لونها أحمر.



يوضِّح الشكل أربعة أمور مهمة:

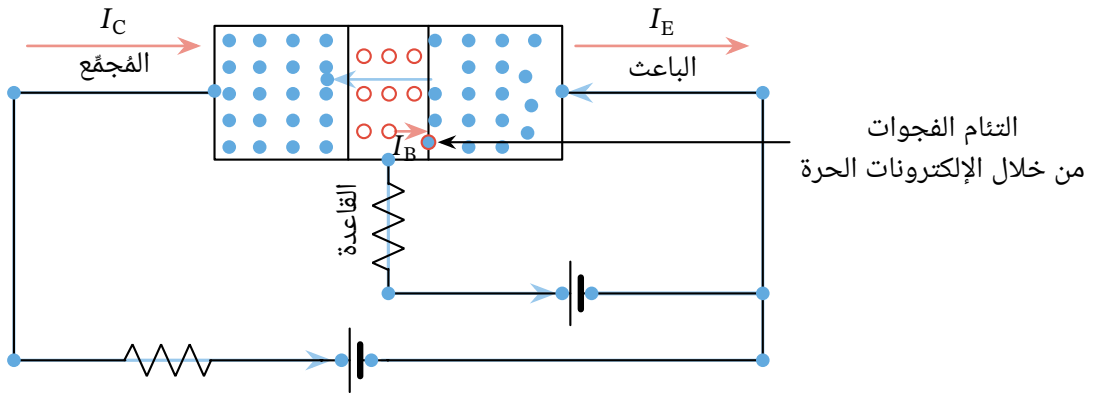
- منطقة القاعدة أقل سمكًا من منطقتَي المُجمِّع والباعث. تكون منطقة القاعدة في ترانزستور حقيقي رقيقة للغاية مقارنةً بالمنطقتين الأخريين. الفرق في السُّمك أكبر بكثير من الفرق الموضَّح في الشكل.
- تركيز الفجوات في منطقة القاعدة أقل بكثير من تركيز الإلكترونات الحرة في منطقتَي الباعث والمُجمِّع.
- الباعث موصَّل أماميًّا، والمُجمِّع موصَّل عكسيًّا.
- يتساوى الجهد عند الطرفين السالبين لمصدرَي فرق الجهد.

تعتمد التيارات المارة في الأجزاء المختلفة من دائرة كهذه على أبعاد مناطق الباعث والقاعدة والمُجمِّع، وعلى خواص المواد شبه الموصِّلة التي صُنعَت منها تلك المناطق الثلاث.

في الدائرة، تكون اتجاهات التيارات في كل وصلة في الترانزستور كالآتي:

- يوجد تيار خارج من وصلة منطقة الباعث. ويمكن الإشارة إليه بالرمز I_E.
- يوجد تيار داخل إلى وصلة منطقة المُجمِّع. ويمكن الإشارة إليه بالرمز I_C.
- يوجد تيار داخل إلى وصلة منطقة القاعدة. ويمكن الإشارة إليه بالرمز I_B.

هذه التيارات موضَّحة في الشكل الآتي. وموضَّح أيضًا تدفُّق الإلكترونات الحرة.



نلاحظ أن I_E ناتج عن الإلكترونات الحرة التي تتحرَّك من الباعث إلى منطقة القاعدة.

تتسارع الإلكترونات الحرة، التي تنتقل من الباعث إلى القاعدة، من خلال التوصيل الأمامي في الباعث باتجاه المُجمِّع. معظم هذه الإلكترونات لديها طاقة كافية للتغلُّب على تأثير التوصيل العكسي عبر المُجمِّع؛ ومن ثَمَّ تمر إلى منطقة المُجمِّع.

تلتئم الفجوات في القاعدة مع جزء صغير من الإلكترونات في منطقة الباعث. ويتكوَّن تيار القاعدة من هذه الإلكترونات.

تعتمد شدة التيار I_B مقارنةً بشدة التيار I_C على سُمك منطقة القاعدة، وعلى الفرق في تركيز التطعيم بمنطقتَي الباعث والقاعدة.

توجد صيغة تعبِّر عن العلاقة بين التيارات في دائرة الترانزستور.

صيغة: العلاقة بين تيارات الباعث والقاعدة والمُجمِّع

ترتبط قيم تيار المُجمِّع، I_C، وتيار الباعث، I_E، وتيار القاعدة، I_B، على النحو الآتي:

$$I_E = I_C + I_B.$$

نسبة I_C إلى I_B تمثِّل قيمة مهمة في دائرة الترانزستور. وفي دائرة ترانزستور الباعث المشترك، تكون قيمة I_B عادةً أقل بكثير من قيمة I_C. وهذا لأن السُمك وتركيز التطعيم في منطقة القاعدة قليلان مقارنةً بمنطقة المُجمِّع.

يمكن تحديد نسبة I_C إلى I_B بالتعبير عن I_C على صورة كسر من I_E. ويُسمَّى ثابت التناسب بين I_C وI_E بـ α_e. وهذا يعني أن:

$$I_C = I_E\alpha_e.$$

ومن ثَمَّ، لا بد أن:

$$I_B = I_E\,(1 - \alpha_e)\,.$$

وبذلك، تُعطى نسبة I_C إلى I_B بالصيغة:

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{I_E \alpha_e}{I_E (1 - \alpha_e)}$$
$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha_e}{1 - \alpha_e} = \beta_e,$$

حيث يُسمَّى β_e نسبة تكبير التيار في الدائرة.

صيغة: نسبة تكبير التيار في توصيل الباعث المشترك

نسبة تكبير التيار في دائرة الترانزستور β_e تُعطى بالصيغة:

$$\beta_e = \frac{I_C}{I_B},$$

حيث I_C تيار المُجمِّع، وI_B تيار القاعدة.

تعتمد شدة التيار I_B مقارنةً بشدة التيار I_C على سُمك منطقة القاعدة، وعلى الفرق في تركيز التطعيم بمنطقتَي الباعث والقاعدة.

في أي دائرة حيث:

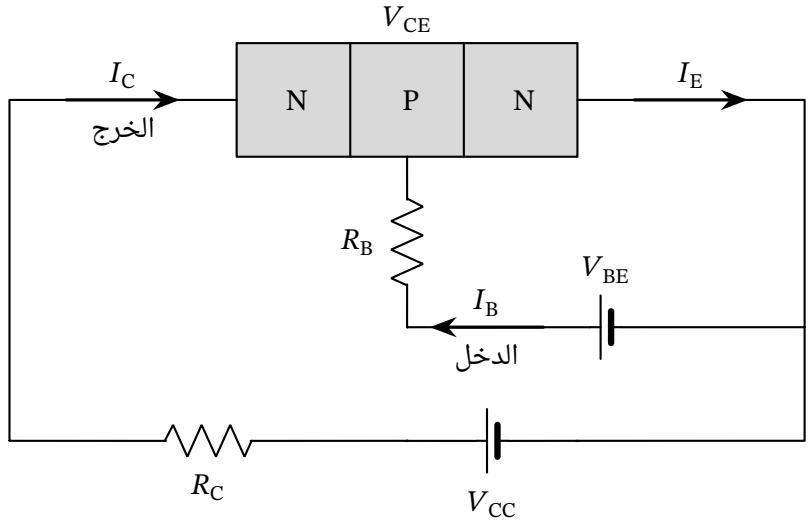
$$I_B \ll I_C,$$

يجب أن يكون:

$$\alpha_e \approx 1$$

ومن ثَمَّ، تكون قيمة β_e كبيرة جدًّا.

يوضِّح الشكل الآتي دائرة ترانزستور الباعث المشترك، والقيم المختلفة للتيارات المارة فيها.



التيارات I_C وI_E وI_B موضَّحة على النحو الآتي:

- V_{CC}، فرق الجهد المزوَّد عبر المُجمِّع والباعث
- V_{CE}، فرق الجهد عبر المُجمِّع والباعث
- V_{BE}، فرق الجهد المزوَّد عبر القاعدة والباعث
- R_C، مقاومة تيار المُجمِّع
- R_B، مقاومة تيار القاعدة

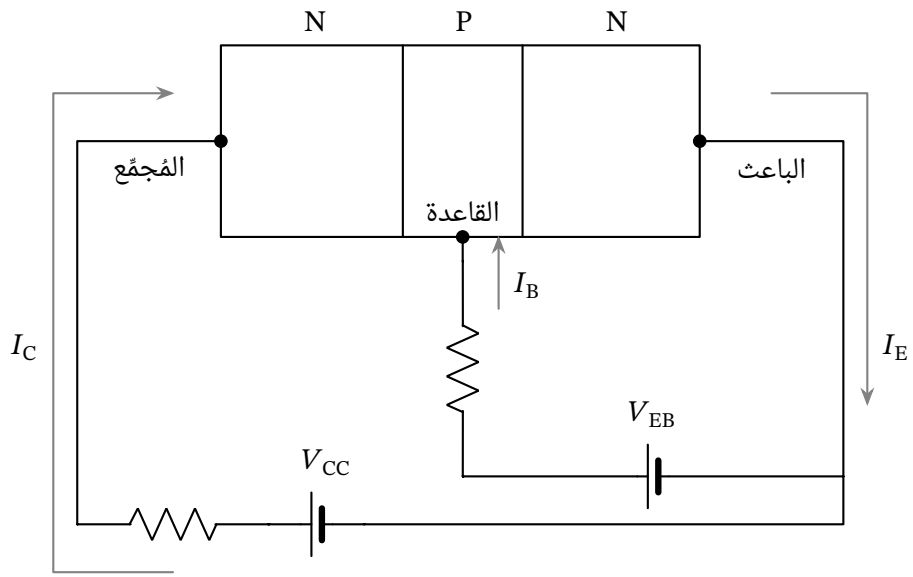
الجهد عند موضع تلامُس منطقة الباعث في الترانزستور يساوي صفرًا مقارنةً بكلٍّ من V_{CC} وV_{BE}.

يُطلَق على V_{BE} جهد الدخل، ويُطلَق على V_{CE} جهد الخرج.

هيا نُلقِ نظرةً على مثال يتضمَّن التيارات في دائرة ترانزستور.

مثال ٢: إيجاد قيمة التيارات في دائرة ترانزستور

وُصِّل ترانزستور NPN بمصدر طاقة جهده V_{CC}. وُصِّل مصدر طاقة جهده V_{EB} بطرفَي الباعث والقاعدة في الترانزستور، كما هو موضَّح بالشكل. يمرُّ التيار $I_C = 99.5\ \text{mA}$ بين V_{CC} وطرف المُجمِّع، والتيار I_E بين V_{EB} وطرف الباعث، والتيار $I_B = 0.5\ \text{mA}$ بين V_{EB} وطرف القاعدة.



١. احسب I_E.

٢. أوجد المعدل الذي تلتئم به الفجوات بواسطة الإلكترونات الحرة المنتشرة عبر القاعدة. استخدم 1.6×10^{-19} C لقيمة شحنة الإلكترون. اكتب الإجابة بالصيغة العلمية لأقرب منزلة عشرية.

الحل

الجزء الأول

المعادلة التي تربط التيارات في الدائرة الكهربية هي:

$$I_E = I_C + I_B.$$

بالتعويض بالقيم المذكورة في السؤال، نجد أن:

$$I_E = 99.5 \text{ mA} + 0.5 \text{ mA} = 100 \text{ mA}.$$

الجزء الثاني

يُفترَض هنا أن تيار القاعدة يتكوَّن بالكامل من إلكترونات حرة تلتئم مع الفجوات الموجودة في القاعدة. والتيار في منطقة القاعدة يساوي 0.5 mA، وهو ما يساوي 5×10^{-4} A. ونحن نعلم أن أمبير واحدًا يساوي كولوم لكل ثانية.

يمكننا إذن حساب عدد الإلكترونات، n، التي تلتئم مع الفجوات كل ثانية لإنتاج هذا التيار من خلال الصيغة:

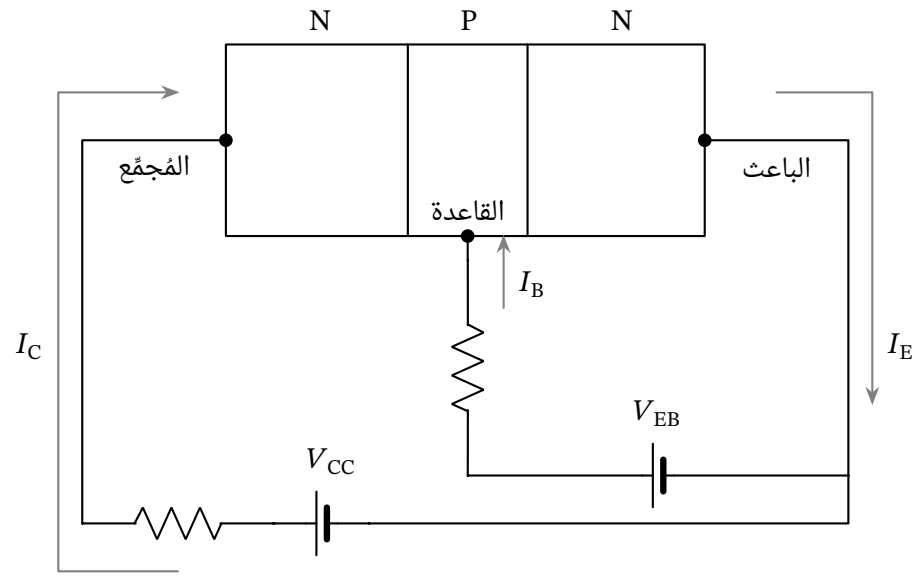
$$n = \frac{5 \times 10^{-4} \text{ C/s}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}}.$$

ومن ثَمَّ، فإن n يساوي $3.1 \times 10^{15}\ \text{s}^{-1}$ بالصيغة العلمية لأقرب منزلة عشرية.

هيا نُلقِ نظرة على مثال يتضمَّن نسبة تكبير التيار في دائرة ترانزستور.

مثال ٣: إيجاد نسبة تكبير التيار في دائرة ترانزستور

وُصِّل ترانزستور من النوع NPN بمصدر طاقة جهده V_{CC}. وُصِّل مصدر طاقة جهده V_{EB} بطرفَي الباعث والقاعدة للترانزستور، كما هو موضَّح بالشكل. يمرُّ التيار $I_C = 99.5\ \text{mA}$ بين V_{CC} وطرف المُجمِّع، والتيار $I_E = 100.0\ \text{mA}$ بين V_{EB} وطرف الباعث، والتيار I_B بين V_{EB} وطرف القاعدة.



١. احسب I_B.

٢. نسبة تكبير التيار المستمر في الترانزستور تساوي نسبة I_C إلى I_B. احسب نسبة تكبير التيار المستمر في الترانزستور.

الحل

الجزء الأول

المعادلة التي تربط التيارات في الدائرة الكهربية هي:

$$I_E = I_C + I_B.$$

يمكننا جعل I_B في طرف بمفرده في هذه المعادلة، وهو ما يُعطينا:

$$I_E - I_C = I_B.$$

بالتعويض بالقيم المذكورة في السؤال، نجد أن:

$$I_{\mathrm{B}} = 100\ \mathrm{mA} - 99.5\ \mathrm{mA} = 0.5\ \mathrm{mA}.$$

الجزء الثاني

نسبة تكبير تيار القاعدة β_e تُعطى بالصيغة الآتية:

$$\beta_e = \frac{I_{\mathrm{C}}}{I_{\mathrm{B}}}.$$

بالتعويض بالقيم المذكورة في السؤال، نجد أن:

$$\frac{99.5\ \mathrm{mA}}{0.5\ \mathrm{mA}} = 199.$$

نستنتج من قانون كيرتشوف الثاني أنه في دائرة الترانزستور:

$$V_{\mathrm{CE}} = V_{\mathrm{CC}} - I_{\mathrm{C}} R_{\mathrm{C}}.$$

نحن نعلم أنه في مثل هذه الدائرة الكهربية يرتبط تيار المُجمِّع وتيار القاعدة بنسبة تكبير التيار وفقًا للصيغة:

$$I_{\mathrm{C}} = \beta_e I_{\mathrm{B}}.$$

وهذا يعني أنه يمكن تغيير I_{C} بزيادة جهد الدخل؛ لأنه بزيادة V_{BE} يزداد I_{B}.

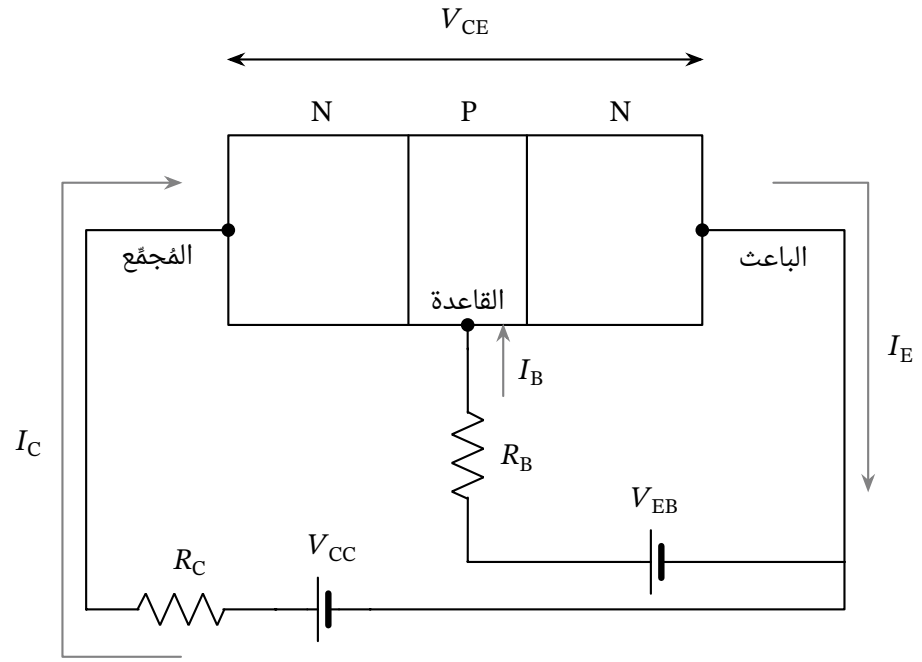
يمكننا أن نسمِّي I_{B} تيار الدخل، وأن نسمِّي I_{C} تيار الخرج.

بالنظر إلى أن β_e ثابت، تكون نسبة I_{B} إلى I_{C} ثابتة في الترانزستور. ونلاحظ بعد ذلك أنه بزيادة تيار الدخل يزداد تيار الخرج.

هيا نُلقِ نظرةً على مثال يتضمَّن التغيُّرات في التيار الكهربي في دائرة ترانزستور.

مثال ٤: العلاقة بين تغيُّرات التيار الكهربي في دائرة ترانزستور

وُصِّل ترانزستور NPN بمصدر طاقة جهده V_{CC}. وُصِّل مصدر طاقة جهده V_{EB} بطرفَي الباعث والقاعدة للترانزستور، كما هو موضَّح في الشكل. يمرُّ التيار I_{C} بين V_{CC} وطرف المُجمِّع، والتيار I_{E} بين V_{EB} وطرف الباعث، والتيار I_{B} بين V_{EB} وطرف القاعدة. وُضِعت المقاومة الخارجية R_{C} بين V_{CC} وطرف المُجمِّع، والمقاومة الخارجية R_{B} بين V_{EB} وطرف القاعدة. فرق الجهد بين طرفَي المُجمِّع والباعث يساوي V_{CE}.



١. إذا قلَّت قيمة R_B، فأيٌّ من الآتي يَصِف تأثير ذلك على قيمة I_C بشكلٍ صحيح؟

أ. يزداد I_C.

ب. يقل I_C.

جـ. يظل I_C ثابتًا.

٢. إذا زادت قيمة R_B فأيٌّ من الآتي يَصِف تأثير ذلك على قيمة I_C بشكلٍ صحيح؟

أ. يظل I_C ثابتًا.

ب. يزداد I_C.

جـ. يقل I_C.

الحل

الجزء الأول

بتقليل R_B يزداد I_B.

نلاحظ من المعادلة:

$$I_C = \beta_e I_B,$$

أنه إذا كانت قيمة β_e ثابتة، فإنه بزيادة I_B يزداد I_C.

الجزء الثاني

بزيادة R_{B} يقل I_{B}.

نلاحظ من المعادلة:

$$I_{\mathrm{C}} = \beta_e I_{\mathrm{B}},$$

أنه إذا كانت قيمة β_e ثابتة، فإنه بتقليل I_{B} يقل I_{C}.

قيمتا الدخل والخرج للتيار لا تتناسبان طرديًّا.

وهذا يعني أن قيمة نسبة تكبير التيار ليست ثابتة، لكنها ثابتة تقريبًا لبعض قيم I_{B} وI_{C}.

لتوضيح كيف يناظر التغيُّر في قيمة I_{B} تغيُّرًا كبيرًا في I_{C}، هيا نوضِّح تأثير تغيُّر طفيف في عدد صغير يُستخدم لقسمة عدد أكبر بكثير.

على سبيل المثال، انظر المعادلة الآتية:

$$n = \frac{a}{b}.$$

افترض أن $a = 1$، وأن $b = 0.002$.

إذن نحصل على:

$$n = \frac{1}{0.002} = 500.$$

والآن، افترض أن لدينا قيمة:

$$\Delta m = \Delta a = -\Delta b.$$

وافترض أن Δm يساوي 0.001.

هذا يعني أن a يزداد بمقدار 0.001، وأن b يقل بمقدار 0.001.

إذن يصبح لدينا:

$$n = \frac{1.001}{0.001} = 1\,001.$$

نلاحظ أن تغيير m بمقدار 0.001 يؤدِّي إلى زيادة n بمقدار 500.

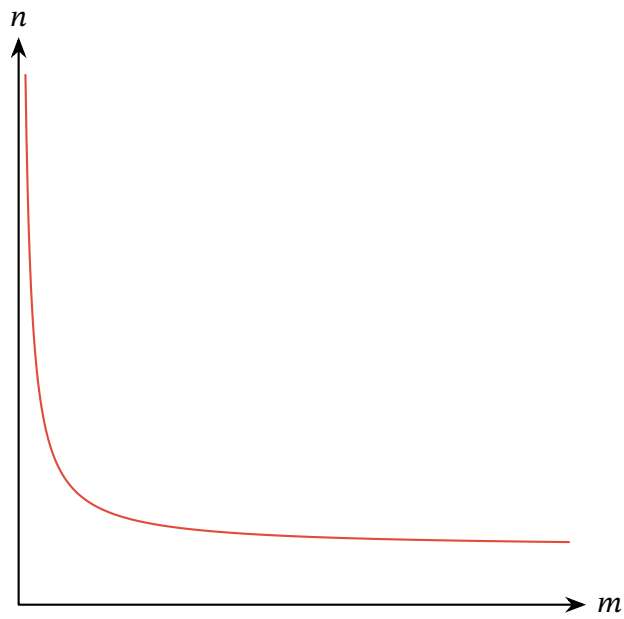
والآن، افترض أن Δm يساوي 0.0015.

إذن يصبح لدينا:

$$n = \frac{1.0015}{0.0005} = 2\,003.$$

نلاحظ أن تغيير m بمقدار 0.0015 قد زاد n بمقدار 1 503.

يوضِّح التمثيل البياني لـ n مقابل m كيف يمكن أن يكون المقدار الذي يزيد به التغيُّر في n أكبر بكثير من التغيُّر في m.



نلاحظ أن هذا التمثيل البياني يتكوَّن من منطقتين. في إحدى المنطقتين تكون قيمة n ثابتة تقريبًا؛ لأن قيمة m تتغيَّر، أما في المنطقة الأخرى فإن قيمة m ثابتة تقريبًا؛ لأن قيمة n تتغيَّر. هاتان المنطقتان تناظران قيمتين ثابتتين تقريبًا لنسبة تكبير التيار في الترانزستور عندما يُستخدَم مفتاحًا مغلقًا ومفتاحًا مفتوحًا.

يمكننا أيضًا النظر إلى جهدَي الدخل والخرج بدلًا من تيارَي الدخل والخرج.

من المعادلة:

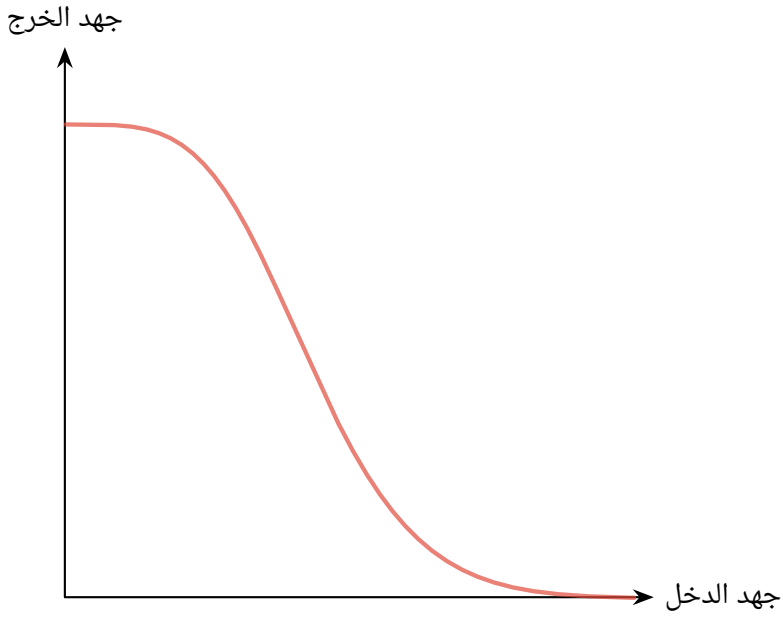
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C,$$

نلاحظ أنه عند أقصى قيمة للتيار I_C، نحصل على أقل قيمة لجهد الخرج.

فإذا قل جهد الدخل، يقل كلٌّ من تيارَي الدخل والخرج. تيار الخرج يساوي صفرًا عندما يساوي تيار الدخل صفرًا.

وعندما يساوي تيار الخرج صفرًا، نحصل على القيمة العظمى لجهد الخرج.

يوضِّح الشكل الآتي التمثيل البياني لتغيُّر جهد الخرج في الترانزستور مُقابل جهد الدخل.



هيا نلخِّص الآن ما تعلَّمناه في هذا الشارح.

النقاط الرئيسية

- يتكوَّن الترانزستور إما من اثنين من أشباه الموصِّلات من النوع n وبينهما شبه موصِّل من النوع p، ويُسمَّى ذلك ترانزستور NPN، أو من اثنين من أشباه الموصلات من النوع p وبينهما شبه موصِّل من النوع n، ويُسمَّى ذلك ترانزستور PNP.
- يتضمَّن الترانزستور ثلاثة أطراف تصله بالدائرة الكهربية: المُجمِّع والباعث والقاعدة. ويتصل كل طرف من الثلاثة بمنطقة واحدة من المناطق شبه الموصِّلة الثلاث.
- يُستخدم الترانزستور في دائرة تحتوي على مصدرين لفرق الجهد. ويكون مصدرا فرق الجهد موصَّلين توصيلًا أماميًّا بالباعث، وتوصيلًا عكسيًّا بالمُجمِّع.
- تعتمد التيارات في الأجزاء المختلفة من دائرة الترانزستور على أبعاد مناطق الباعث والقاعدة والمُجمِّع، وخواص المادة شبه الموصِّلة التي صُنعَت منها تلك المناطق الثلاث.
- المعادلة التي تربط التيارات في أطراف الباعث، I_{E}، والمُجمِّع، I_{C}، والقاعدة، I_{B}، هي:

$$I_{\mathrm{E}} = I_{\mathrm{C}} + I_{\mathrm{B}}.$$

- الصيغة التي تربط التيارين في طرفَي الباعث، I_{E}، والمُجمِّع، I_{C}، هي:

$$I_{\mathrm{C}} = I_{\mathrm{E}}\alpha_e,$$

حيث α_e ثابت.

- الصيغة التي تربط التيارين في طرفَي المُجمِّع، I_C، والقاعدة، I_B، هي:

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha_e}{1 - \alpha_e} = \beta_e,$$

حيث β_e نسبة تكبير التيار في الدائرة.

- أي تغيُّر طفيف في I_B يمكن أن يؤدِّي إلى تغيُّر أكبر في I_C، ما يتيح للدائرة التي تتضمَّن الترانزستور أن تعمل فعليًا مفتاحًا لفتح التيار I_C أو غلقه.